

氏 名	袁 繼輝 (Yuan Jihui)
学 位 の 種 類	博士 (学 術)
学 位 記 番 号	第 6162 号
授与報告番号	甲第 3482 号
学位授与年月日	平成 27 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学 位 論 文 名	Study on heat reflective building coatings as a method to mitigate hot urban environments (都市域における暑熱環境緩和のための建物外皮熱反射手法の研究)
論文審査委員	主 査 教 授 永村 一雄 副 査 教 授 多治見 左近 副 査 教 授 渡部 嗣道

論 文 内 容 の 要 旨

本論は、都市域において年々厳しくなる都市域の酷暑環境を改善すべく、放熱源となっている建物外皮を高反射化するための対策を提示し、加えて新たな再帰反射型外皮の開発を試みた。

近年、地球温暖化による気温上昇が明確になり、グリラ豪雨にみられる都市災害などの被害も増えてきている。これに拍車を掛けているのがヒートアイランド現象であり、都市域では夏期の酷暑環境が厳しさを増している。既往の研究から、こうした熱源は、建物外壁の蓄放熱と空調用室外機の排熱で全体の 2/3 を占めていることがわかっている。本論では、このうちの前者、即ち建物外壁の対策を考え、都市域の酷暑環境緩和に役立てることを目的とした。

実用に供される建築物である以上、耐候性は当然、具備すべき性能であるが、現在市販され始めている拡散型高反射素材の多くは、耐久性に関して不明なことが多く、外皮として曝露された際の反射率の低下に関しても現場を意識した調査研究は少ないのが現状である。そこで、本論の前半は、実用化されている拡散型高反射素材を屋上に施工した建物を対象に、反射率の経時変化を計測すると同時に、外皮素材の物理的・機構的劣化の有無を調べた。つぎに、拡散型の反射は、建物外皮の大半を占める外壁に適用できない弱みがあることから、反射経路を工夫した再帰型反射素材の開発を本論の後半で行った。型の異なる 2 つの反射素材を用いた建物や街区の熱特性を数値実験で調べ、酷暑の緩和と省エネルギーの観点で計画に資するための図表も併せて作成した。

本論全体は 5 章で構成されており、第 1 章では、本論文の背景と目的を述べた。

第 2 章は、建物外皮の高反射材に関する研究をまとめた。開発を経て市販されている高反射関連材料は高反塗料と高反射シート(防水型含)を対象に、現時点で不明な点が多い耐候性に関して、構造劣化と熱性能の低下の有無を中心に調査を行った。2010 年 11 月から 2012 年 5 月までの約 19 ヶ月間、屋上の高反射防水シートの日射反射率の経時変化を調べた。波長域の違いによる反射率の変化は同一であり、可視域と近赤外域による反射率に関わらず、約 0.05 の低下が見られたが、表面洗浄後の反射率は約 0.16 と初期の値に回復した。また、可視域より近赤外域の反射率は約 0.1 高いことが判った。これらより、高反射防水シートの長期にわたっての耐候性は担保できるとの見通しがたった。

第 3 章では、新たに再帰型の反射構造を有する外皮素材の作成を行った。前章の拡散型高反射材では、反射の大半は周辺建物や道路に向かうことになり、都市域の熱放射環境の改善に必ずしも役立たない。つまり、反射の経路を入射方向に戻すことが反射の特性として望ましいことになる。外

皮にこの機能を付与した素材を新たに開発し、耐候性などを調べたのが本章である。まず、再帰反射率の求め方を提案した。拡散反射に対応した分光光度計による反射率を計測し、次いで、すべての反射に対応した熱収支による反射率を推定して、両者の差から、再帰分を抽出する手法を開発した。また、再帰反射材の耐候性を検証した。開発対象はカプセルシート型とプリズム型の 2 つとした。カプセルシート型再帰反射材では、当初、再帰反射率 0.18 だったものが、23 ヶ月間の屋外曝露で 0.173 まで低下してしまい、加えて構造的な劣化もみられた。このためか、表面洗浄による再帰反射率の回復もみられなかった。他方、プリズム型は、再帰反射率の低下が 0.02 と少なく、洗浄による再帰反射率の復元も確認でき、構造的な劣化は見みられず、開発素材としては、プリズム型の耐候性が優れていることが判明した。

第 4 章では、外皮の反射熱特性と都市域の街区の熱放射環境の関係、および高反射外皮と建物の省エネルギーの関係について調べた。既往研究の知見と併せて、都市キャニオン部の日射反射率を検討し、再帰反射外皮のときにキャニオン部への熱侵入が最も少なく、結果として酷暑環境の改善に一定の効果があることがわかった。また、空調用熱負荷の面では、本論の高反射外皮は日射熱負荷を軽減できるため、夏期に有利となるが、逆に冬期は不利点となるので、断熱材の併用が大事であり、その際、建物計画に必要な最適断熱材厚さを探索できる図を作成した。

第 5 章では、以上の章を総括し、高反射外皮により都市域の酷暑環境を改善する方途をまとめた。すなわち、市場で流通している高反射シートの耐候性・熱特性に問題はないこと、高反射の外皮を都市域に適用したとき、都市域のアルベドは大きくなり、酷暑の原因となっている熱放射環境は改善されること、その改善は新たな反射特性である再帰反射がもっとも効果的であることが判明した。くわえて、断熱化とともに高反射化した建物では、省エネルギーにも寄与することをしめした。

論文審査の結果の要旨

近年、都市域では、気候変動にともなう地球温暖化とともに、ヒートアイランド現象が顕在化しており、とくに夏季において、日射による熱放射で厳しい暑熱環境が形成されることが多い。暑熱環境が過酷になるにつれ、この状況を緩和するための対策が種々講じられてきた。都市計画の視点では緑化がその代表例であるが、建物が林立する街区では、平地での緑地率の向上に限界があり、結果として建物に依存した屋上緑化や壁面緑化が模索された。しかるに、緑化を維持するためのエネルギー消費量がかえって建物の省エネルギーに反すること、建設コストや維持コストが膨大になるなどの欠点もあらわになってきている。

一方で、都市域の熱放射由来の排熱の大半が建物外皮によること、空調室外機による排熱とあわせると全体の 6 割を占めるとの既往研究を考慮すれば、建物外皮の反射率を高くして、都市域に侵入する熱放射自体を低減化する方策、つまり建物外皮の高反射化という手法が現実味を帯びてくる。

本論文は、この建物外皮熱反射手法を実践するべく、現状の高反射材の耐候性にかんする課題を長期測定により検証したうえで、より希求度の高かった再帰反射型の外皮作成にかんして有用な知見を提供している。

5章からなる本論の第1章で、冒頭にのべた都市域の暑熱環境の背景や原因の特定、これまでの対策の概説、建物の消費エネルギーによる人工排熱の増加とその低減化に役立つ建物の省エネルギー化の重要性について述べている。

第2章では、都市域に侵入する日射放射を抑制すべく考案され市場に登場した高反射型の外皮について、これまでの基礎研究から実用化に至るまでの経緯を説明している。それによれば、新素材であるがゆえに長期の耐候性に関する情報提示が十分でなく、結果として採用実績も少ない現状を憂いており、これを改善するには、現実には施工された高反射材を対象にした現場での長期にわたる日射反射率の測定が必要であると判断し、大阪市内の小中学校の屋上に施工された高反射型防水シートの日射反射率を約19ヶ月間にわたって実測している。その結果、高反射防水シートの反射率の低下がわずかに0.05程度であったこと、堆積したであろう塵埃は降雨でかなりの程度洗い流されること、表面洗浄により塵埃を除けば外皮は初期の反射率に回復することなど、高反射外皮が十分な耐候性を有することを保証する結果が得られている。

続く第3章では、あらたな反射材の作成を試み、市場への投入を意図した耐候性試験を行っている。すなわち、現状で市販されている高反射材の反射特性は拡散反射であるため、高層建物の屋上になら適用可能だが、日射受熱面積の大きい外壁に拡散反射面を用いると、対向する建物群への反射となってしまうこと、また都市キャニオンとよばれる建物間の空間に大半が吸収されてしまうなど、本来の目的にそぐわない点を有している。そこで、高反射面を有する錐状体や球状ビーズを反射面に配したあらたな素材を提案し、反射自体を逆方向にのみ反射できる外皮素材を試作している。これを再帰反射材と定義し、単なる高反射よりのぞましい反射特性であることを示すとともに、耐候性試験を長期にわたって行っている。あらたな反射形態であるため、再帰反射率そのものの定義が存在せず、計測方法から考案しており、耐候性のため曝露結果では、試作に用いたカプセルシート型の外皮素材では、23ヶ月間の屋外曝露で反射率がほぼゼロに近くなり、表面層にも物理的な劣化がみられたこと、一方でもうひとつの外皮素材であるプリズムシート型は、表面損傷はみらないばかりか、反射率低下もわずか0.02程度に収まり、施工初期時の0.44という高い再帰反射率をほぼ維持できることを実証した。くわえて、表面を高透過度のガラスで覆った改良型素材では、実測期間約1年間ではあるが、反射率低下のほぼみられない良好な結果を得ている。

第4章は、前の2つの章で論じた高反射材・再帰反射材を実際に建物に用いた際の影響評価をおこなっている。はじめに、建物外皮に高反射と再帰反射を施工したとき、都市キャニオン全体の反射率、アルベドが高くなることを既往研究の検討から示した後、現状で入手可能な高反射材を用いた場合、どの程度の効用があるか、そして逆に冬季に熱負荷が減少する欠点を断熱化で補えるかを、第2章で調査した学校を事例に検討し、断熱改修を同時におこなうことで、年間の熱負荷の面からも省エネルギーに貢献できることを示した。こうした手順をより普遍的な手法とするべく、現実には建物群が林立している上海を想定し、高層建物で外皮を反射化するために必要な反射率と断熱性能の関連性について数値実験をおこない、都市と建物双方にとつ

て良好な環境を築くための具体的な手順化を示した。

第5章は、前章までのまとめを行い、夏季に厳しくなる都市域の暑熱環境の改善には、高反射・再帰反射外皮が有効であり、高反射については耐候性に問題のないこと、再帰反射では、近い将来、市場投入への活路を拓く知見を提示できたこと、そして反射手法の欠点である冬季の熱負荷低下に対しては、建物断熱化を同時に行うことで年間を通じて都市にも建物自身にも良好な環境をもたらすことを影響評価により確認し、こうした取り組みを、今後は施策として位置づけることが重要であるとして総括している。

建物外皮の高反射化の一部はすでに実用化の段階にあり、その意味で、本研究が提示した現場での長期実測による外皮の熱性能検証はきわめて重要である。実際への応用を意識し、これほど長期にわたる実証は例をみないこと、都市域の建物計画に資する重要な情報を提供していること、そして、次世代の反射機構として位置づけられる再帰反射化に対し、着実な改善をもたらす知見を提示できたことは、この領域における大きな貢献といえよう。

以上により、審査委員会は本論文が博士（学術）の授与に値するものと認めた。